

МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЫГОРАНИЯ НА ОСНОВЕ ИЗМЕРЕНИЙ ХАРАКТЕРИСТИК СОБСТВЕННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ОТРАБОТАННОГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА

В данной статье предлагается более перспективный метод реконструкции томограмм. Он основывается на идее находить решение переопределенной системы применяя псевдообратную матрицу Мура-Пенроуза. Для обоснования предложенной идеи, в ходе имитационного моделирования, был проведен ряд исследований по восстановлению активностей твэлов для различных энергий изотопов, числа точек измерений n и количества энергий используемых при реконструкции томограмм.

Ключевые слова: энергия изотопа, имитационное моделирование, реконструкция томограмм

Вступление. Развитие атомной энергетики с ядерным топливным циклом, в основу которого положен принцип радиационно-эквивалентного захоронения радиоактивных отходов (РАО) с их временным промежуточным хранением, выдвигает требование контроля состояния отработанного ядерного топлива (ОЯТ). Это, в первую очередь, выгорание, изотопный состав ядерных материалов и продуктов деления, данные о состоянии оболочек тепловыделяющих элементов и др. Сейчас не все из перечисленных параметров определяются путем измерений непосредственно на АЭС или определяются расчетными и качественными методами, что противоречит нормативным требованиям по ядерной безопасности. Успешное решение проблемы безопасной и эффективной эксплуатации ядерного топлива напрямую связано с внедрением в технологические процессы принципиально новых технологий контроля и диагностики. Одной из таких новых технологий является контроль ядерного топлива (ЯТ) в процессе его перегрузки с целью определения глубины выгорания путем измерения собственного излучения ТВС [1]. Такой контроль по своему принципу является информационно избыточной процедурой – собственное излучение сборки содержит достаточную информацию не только о состоянии сборки в целом, но и о каждом из образующих ее твэлов. Одной из технологий извлечения и обработки этой информации с целью максимально полной оценки состояния топлива внутри ТВС является пассивная алгебраическая реконструктивная томография [2].

Основная часть. В данной работе предлагается более перспективный метод реконструкции томограмм. Он основывается на идее находить решение переопределенной системы применяя псевдообратную матрицу Мура-Пенроуза [3], при этом решение системы принимает вид:

$$A=W^{\#}I \quad (1)$$

Псевдообратная матрица $W^{\#}$, соответствующая $(m \times n)$ матрице W однозначно определяется через компоненты разложения матрицы W по сингулярным числам согласно процедуре SVD-разложения [1].

Для обоснования предложенной идеи, в ходе имитационного моделирования, был проведен ряд исследований по восстановлению активностей твэлов для различных энергий изотопов, числа точек измерений n и количества энергий используемых при реконструкции томограмм.

В общем виде алгоритм исследований для одной энергии выглядел следующим образом [1].

Шаг 1. Задаются количеством n положений детектора в пространстве или иначе количеством измерений.

Шаг 2. Рассчитываются коэффициенты ослабления интенсивности излучения для каждого m -го твэла и n -го положений детектора в пространстве:

Шаг 3. Для 331 элементов ТВС задаются активности реперных изотопов: для всех 312 твэлов — единичные, для 19 стержневых отверстий — нулевые. Рассчитываются интенсивности, измеренные в n точках расположения детектора:

Шаг 4. Для имитации шумов, сопровождающих натурные измерения, на сгенерированные компоненты вектора \mathbf{I} накладывается нормальный шум с дисперсией δ , равной 3-10% от значения максимальной компоненты вектора \mathbf{I} .

Шаг 5. Рассчитывается псевдообратная матрица $\mathbf{W}^\#$.

Шаг 6. Рассчитывается восстановленное значение активности твэлов путем решения уравнения (4).

На рисунках 1-8 представлена реконструированная томограмма ТВС, содержащей один негерметичный твэл с микродефектом.

Далее приведен анализ результатов исследования процесса восстановления активностей твэлов.

Для моделирования неравномерного поля распределения активности в зоне реактора, в исходных данных, поле активностей твэлов имело наклон слева направо. Величина наклона составляла 25%. При этом активности твэлов равномерно изменялись от 1 (слева) до 1.25 (справа) рис. 1.

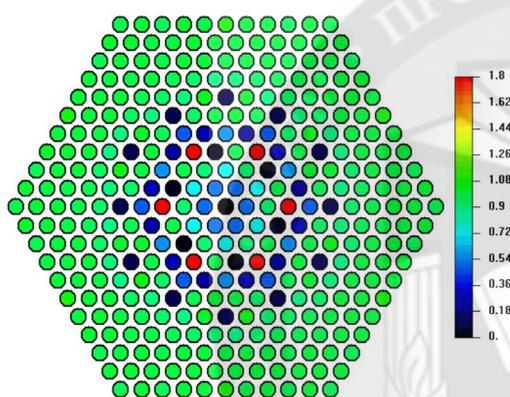


Рис. 1. Восстановленное распределение активности ^{137}Cs для ТВС с неповрежденными твэлами

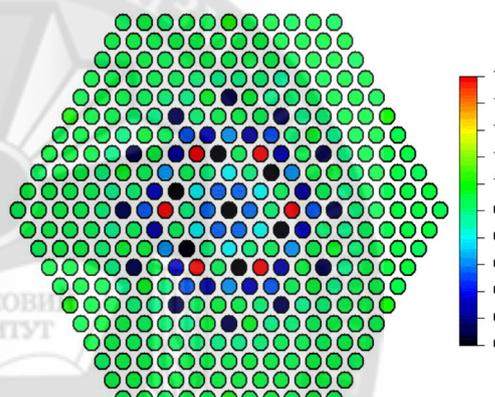


Рис. 2. Восстановленное распределение активности ^{137}Cs для ТВС при уменьшении активности в единичном твэле на участке высотой до 20 см на 10 %

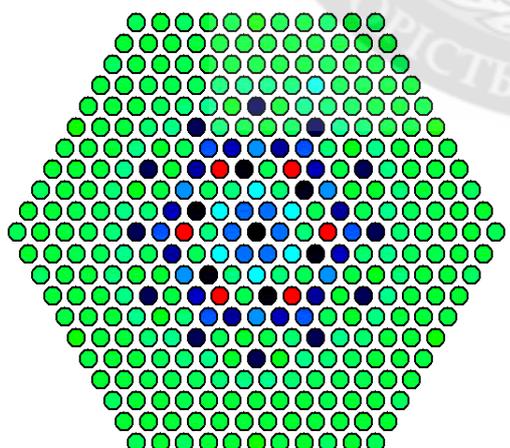


Рис. 3. Восстановленное распределение активности ^{137}Cs для ТВС при уменьшении активности в единичном твэле на участке высотой до 20 см на 20 %

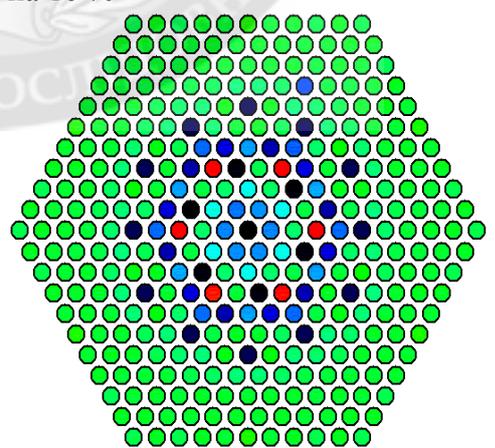


Рис. 4. Восстановленное распределение активности ^{137}Cs для ТВС при уменьшении активности в единичном твэле на участке высотой до 20 см на 40 %

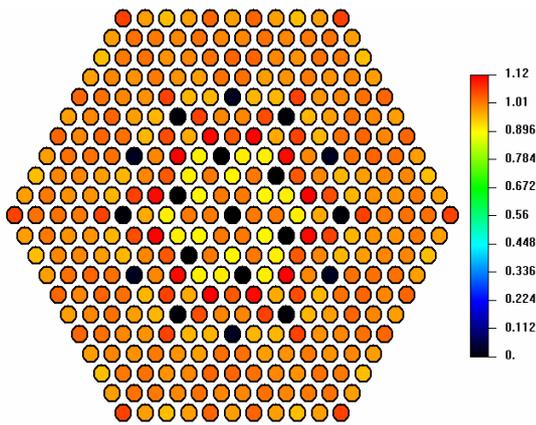


Рис. 5. Восстановленное распределение активности ^{134}Cs для ТВС с неповрежденными твэлами

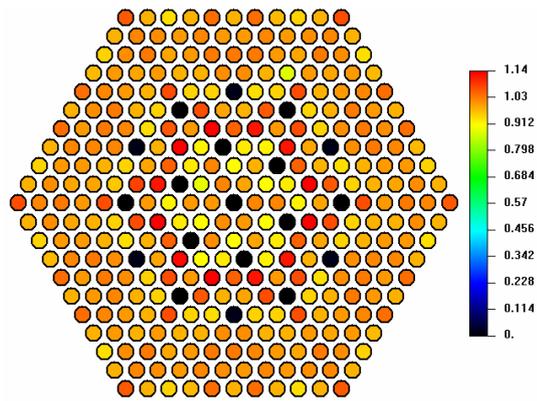


Рис. 6. Восстановленное распределение активности ^{134}Cs для ТВС при уменьшении активности в единичном твэле на участке высотой до 20 см на 10 %

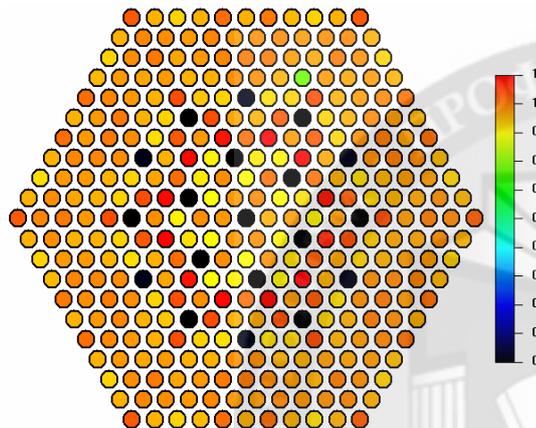


Рис. 7. Восстановленное распределение активности ^{134}Cs для ТВС при уменьшении активности в единичном твэле на участке высотой до 20 см на 20 %

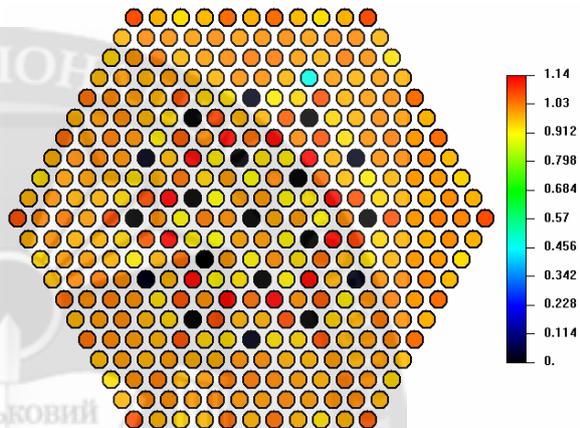


Рис. 8. Восстановленное распределение активности ^{134}Cs для ТВС при уменьшении активности в единичном твэле на участке высотой до 20 см на 50 %

Предварительный анализ полученных томограмм показал, что каких-либо общепринятых критериев оценки качества восстановления активности твэлов нет. Поэтому было решено исследовать восстановленные томограммы с точек зрения относительной дисперсии δ^* отклонения активностей твэлов в пределах всей томограммы, относительной дисперсии отклонения активностей твэлов δ_i^* в пределах одного ряда, максимального отклонения активности в пределах одного ряда A_i^{\max} и гистограммы отклонения активностей твэлов. Для расчета δ^* и δ_i^* за точку отсчета были взяты соответственно дисперсия активности твэлов исходной модели и дисперсия активности твэлов в пределах соответствующего ряда.

Анализ восстановленных томограмм позволил сделать важный вывод: с увеличением количества измерений, качество восстановленных томограмм улучшается незначительно. Была предложена идея восстанавливать активности твэлов по нескольким значениям энергий. С вычислительной точки зрения нет особой разницы восстановить томограмму по 720 показаниям детектора или по 360 для двух значений энергии. Потому был сформирован новый ряд томограмм, восстановленных по нескольким (2÷4) энергиям.

Дальнейший анализ подтвердил целесообразность предложенной идеи. На рис. 10 представлены зависимости относительной дисперсии δ^* от уровня шума для различного количества энергий используемых при восстановлении томограмм.

Во-первых, с повышением уровня шума, для случая одной энергии, величина δ^* приобретает существенный разброс. На практике это означает, что невозможно заранее предсказать можно ли будет извлечь из результата восстановления томограмм полезную информацию.

Во-вторых, использование в процессе восстановления нескольких энергий позволяет понизить параметр δ^* на 2÷3 порядка! Это хорошо видно на рис. 9. Хотя с вычислительной точки зрения эти два случая совершенно одинаковы, использование двух энергий дает существенный выигрыш.

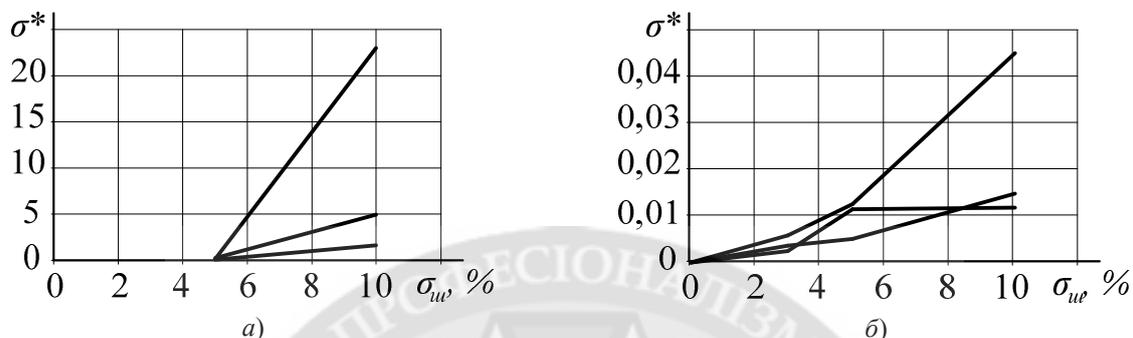


Рис. 9. Зависимости относительной дисперсии σ^* от уровня шума $\sigma_{ш}$ для различного количества энергий N_E и измерений n : $N_E=1$, $n=720$ (а); $N_E=2$, $n=360$ (б)

Анализ зависимостей на рис. 9 позволяет сделать ряд важных выводов.

В-третьих, рост числа измерений $n > 360$ не представляется целесообразным. Дополнительные исследования показали также, что уменьшение числа измерений ведет резкому снижению качества. Таким образом, число измерений $n=360$ представляется наиболее предпочтительным.

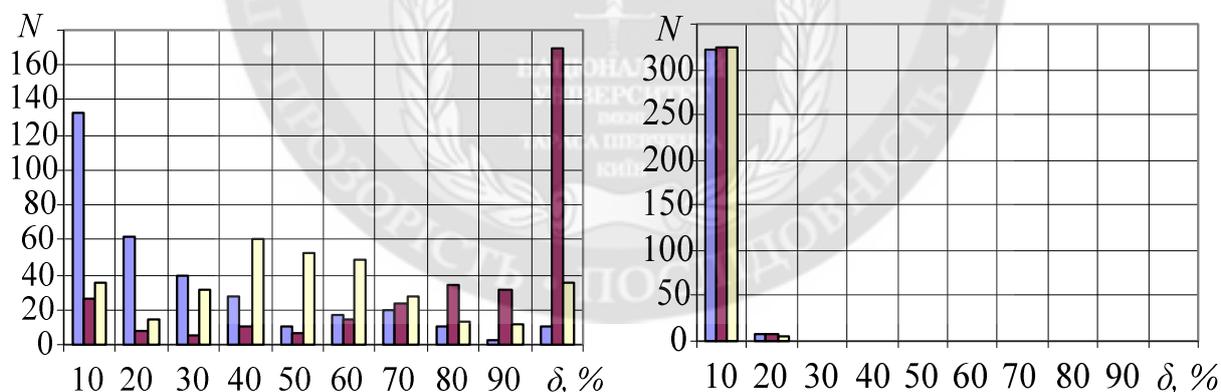


Рис. 10. Гистограммы отклонения активности твэлов от истинного значения для различного количества энергий N_E и измерений n : $N_E=1$, $n=720$ (а); $N_E > 1$, $n=360,720$ (б)

В-четвертых, с вычислительной точки зрения нецелесообразно использовать при восстановлении более 3-х энергий, так как при этом соотношение «выигрыш в качестве» / «затрачиваемые ресурсы» стремится к нулю.

Результаты анализа относительной дисперсии δ^* позволили сделать выводы о точности SVD-метода в целом, но они не позволяют ответить на вопрос как найти дефектный твэл.

В ходе дальнейшего исследования были получены гистограммы представленные на рис. 10. На оси абсцисс отложена величина отклонения активности твэла от истинного в %. На

оси ординат — доля твэлов приходящаяся на данный диапазон отклонения. Все гистограммы соответствуют уровню шума 10%.

Анализ представленных гистограмм подтвердил идею использования нескольких энергий для восстановления активности твэлов. Кроме того, анализ гистограмм для различных энергий показал, что для реконструкции томограммы целесообразно использовать энергии одного изотопа, а именно Cs^{134} . Так как распределение для каждой энергии изотопа одинаковое, это наилучшим образом позволяет компенсировать дефекты восстановления томограммы. Так для Cs^{134} было обнаружено, что величина отклонения активности восстановленных твэлов от истинных значений не превышает 30%, общее количество твэлов с отклонениями активности более 10% от истинного не превышает $8 \div 10$ штук.

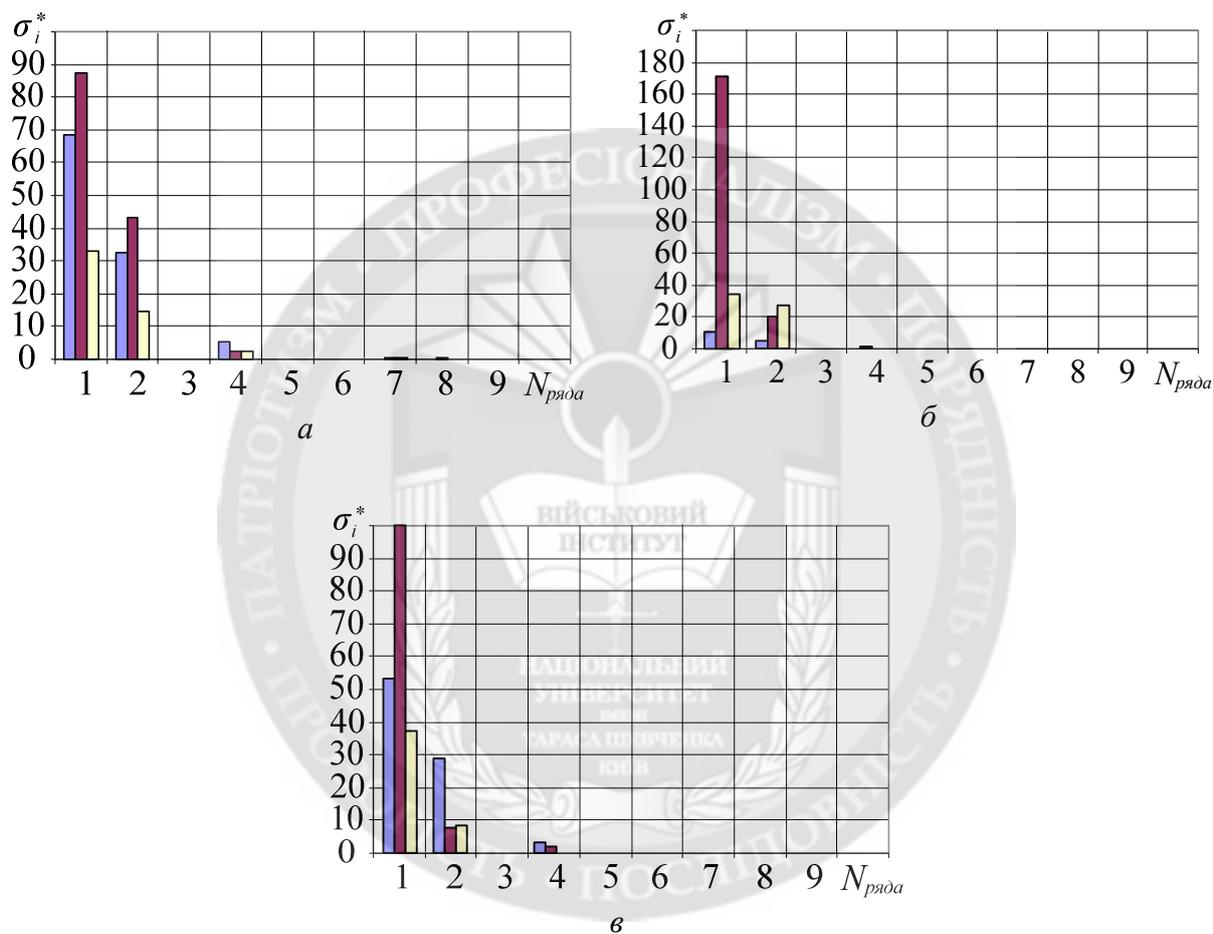


Рис. 11. Гистограммы зависимости относительной дисперсии отклонения активностей твэлов σ_i^* от номера ряда $N_{\text{ряда}}$: $N_E = 2$, $n = 360$ (а); $N_E = 3$, $n = 360$ (б); $N_E = 4$, $n = 360$ (в)

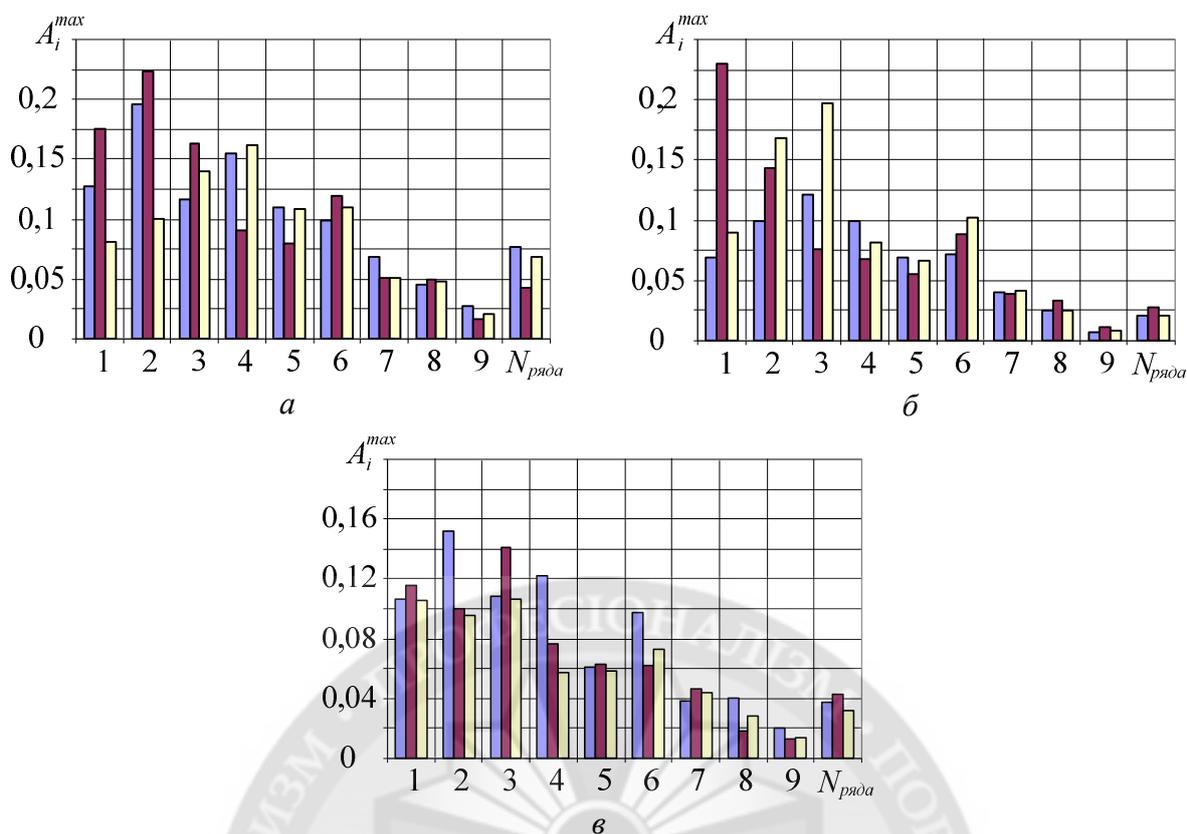


Рис. 12. Гистограммы зависимости максимального отклонения активности A_i^{\max} от номера ряда $N_{\text{ряда}}$: $N_E = 2$, $n = 360$ (а); $N_E = 3$, $n = 360$ (б); $N_E = 4$, $n = 360$ (в)

Выводы. Полученные результаты позволили сделать предположение, что в случае выбора соответствующей точки отсчета, на восстановленных томограммах можно будет идентифицировать дефектные твэлы с уровнем протечки более 30%.

Заключительный анализ экспериментальных данных предусматривал построение зависимостей для относительной дисперсии отклонения активностей твэлов δ_i^* в пределах одного ряда и максимального отклонения активности в пределах одного ряда A_i^{\max} . Данные зависимости представлены на рис. 3 и 4 соответственно.

Общий вывод, который можно сделать по результатам анализа данных рис. 11, 12 заключается в том, что наибольшая погрешность восстановления наблюдается в центре томограммы. В крайних рядах, наиболее неблагоприятных с точки зрения вероятности появления дефектного твэла, точность восстановления томограммы наивысшая.

Таким образом, полученные результаты анализа восстановленных томограмм позволяют сформулировать следующие рекомендации к алгоритму восстановления, использующему SVD-разложение.

- 1) Количество энергий, по которым ведется восстановление томограмм должно равняться $2 \div 3$.
- 2) Целесообразно использовать энергии изотопа ^{134}Cs .
- 3) Количество измерений целесообразно выбрать равным 360.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Determination of the burnup of spent nuclear fuel during reloading / S.G. Oleinik, M.V. Maksimov, O V. Maslov // Atomic Energy. – 2002, Vol. 92, No. 4. – P. 296-300.
2. Шеннон Р. Имитационное моделирование систем: искусство и наука. Перевод с англ. – М. "Мир", 1978. – 418 с.
3. Хемометрика / М. Шараф, Д.Л. Иллмэн, Б.Р. Ковальски : Пер. с англ. – Л.: Химия, 1989. – 272 с.

Рецензент: д.т.н., проф. Ленков С.В., начальник науково-дослідного центру Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка

д.т.н., проф. Мокрицький В.А., д.т.н., проф. Маслов О.В., к.т.н. Банзак О.В.
**МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ ВИГОРАННЯ НА ОСНОВІ ВИМІРЮВАНЬ
ХАРАКТЕРИСТИК ВЛАСНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ ВІДПРАЦЬОВАНОВОГО
ЯДЕРНОГО ПАЛИВА**

У даній статті пропонується більш перспективний метод реконструкції томограм. Він ґрунтується на ідеї знаходити рішення перепевної системи застосовуючи псевдозворотню матрицю Мура-Пенроуза. Для обґрунтування запропонованої ідеї, у ході імітаційного моделювання, був проведений ряд досліджень по відновленню активності твелів для різних енергій ізотопів, числа крапок вимірів n і кількості енергій використовуваних при реконструкції томограм.

Ключові слова: енергія ізотопу, імітаційне моделювання, реконструкція томограм

Mokritsky V., Maslov O., Banzak O.
**METHODS BURNOUT ON THE BASIS OF ITS OWN CHARACTERISTICS OF
RADIATION MEASUREMENT SPENT NUCLEAR FUEL**

In the article the more perspective method of reconstruction of tomograms is offered. It is based on idea to find the decision of the redefined system applying pseudo return Moore-Penroses matrix. For a substantiation of the offered idea, during imitating modelling, a number of researches on restoration activity twelles for various energy isotopes, number of points of measurements n and quantities energy tomograms used at reconstruction has been lead.

Keywords: energy of an isotope, imitating modelling, reconstruction of tomograms .

